

PAT-NO: JP02000315654A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 2000315654 A

TITLE: FORMATION METHOD OF POSITION-CONTROLLED QUANTUM DOT OF
NITRIDE SEMICONDUCTOR IN DROPLET EPITAXY, QUANTUM BIT
ELEMENT STRUCTURE IN QUANTUM COMPUTER AND QUANTUM
CORRELATION GATE ELEMENT STRUCTURE

PUBN-DATE: November 14, 2000

INVENTOR-INFORMATION:

| NAME | COUNTRY |
|---------------------|---------|
| AOYANAGI, KATSUNOBU | N/A |
| KAWASAKI, KOJI | N/A |
| TSUTSUI, KAZUO | N/A |

ASSIGNEE-INFORMATION:

| NAME | COUNTRY |
|---------------------------------|---------|
| INST OF PHYSICAL & CHEMICAL RES | N/A |

APPL-NO: JP11124378

APPL-DATE: April 30, 1999

INT-CL (IPC): H01L021/203, H01L021/208

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To form a quantum dot of a nitride semiconductor such as GaN, InN, or AlN, InGaN, AlGaN, etc., while controlling its position.

SOLUTION: A method for forming a position-controlled quantum dot of a nitride semiconductor in droplet epitaxy is provided with a first process, where by applying an external field to a surface of a substrate 1 that has surface energy lower than that of metal raw material, the surface condition of the substrate is modulated to modify the surface, a second process where the metal raw material is supplied to the substrate whose surface is modified in the first process to form a metal droplet 2 on the place whose surface is modified in crystal growth, and a third process, wherein by supplying nitrogen source onto the substrate on which the metal droplet 2 is formed in the second process, the metal droplet is nitrided to form the quantum dot 4 of the nitride

PATENT-FAMILY:

| PUB-NO | PUB-DATE | LANGUAGE | PAGES | MAIN-IPC |
|-----------------|-------------------|----------|-------|----------|
| JP 2000315654 A | November 14, 2000 | N/A | 020 | H01L |

APPLICATION-DATA:

| PUB-NO | APPL-DESCRIPTOR | APPL-NO | APPL-DATE |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| JP2000315654A | N/A | 1999JP-0124378 | April 30, 1999 |

INT-CL (IPC): H01L021/203, H01L021/208

ABSTRACTED-PUB-NO: JP2000315654A

BASIC-ABSTRACT:

NOVELTY - Surface condition of a substrate (1) is modified by applying an external field having energy lower than the surface energy of metallic raw material included in the substrate. A semiconductor crystal material (2) is formed on processed substrate by droplet epitaxy and nitrogen is added to it, followed by suitable heat-treating.

DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is also included for light emitting element structure.

USE - For forming nitrogen semiconductor group light emitting element like GaN, InN, AlN, InGaN, AlGaN group semiconductor light emitting element used for optical and electronic devices.

ADVANTAGE - Position control of nitride semiconductor material is improved, hence enhances manufacturing efficiency.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows the explanatory diagram of nitride semiconductor light emitting element formation method.

Substrate 1

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-315654

(P2000-315654A)

(43)公開日 平成12年11月14日(2000. 11. 14)

| (51)Int.Cl. ⁷ | 識別記号 | F I | テマコード*(参考) |
|--------------------------|------|----------------|-------------|
| H 0 1 L 21/203 | | H 0 1 L 21/203 | Z 5 F 0 5 3 |
| 21/208 | | 21/208 | Z 5 F 1 0 3 |

審査請求 未請求 請求項の数16 O L (全 20 頁)

(21)出願番号 特願平11-124378

(22)出願日 平成11年4月30日(1999. 4. 30)

(71)出願人 000006792

理化学研究所

埼玉県和光市広沢2番1号

(72)発明者 青柳 克信

埼玉県和光市広沢2番1号 理化学研究所
内

(72)発明者 川崎 宏治

東京都町田市成瀬4908第二みちうえコーポ
103

(74)代理人 100087000

弁理士 上島 淳一

最終頁に続く

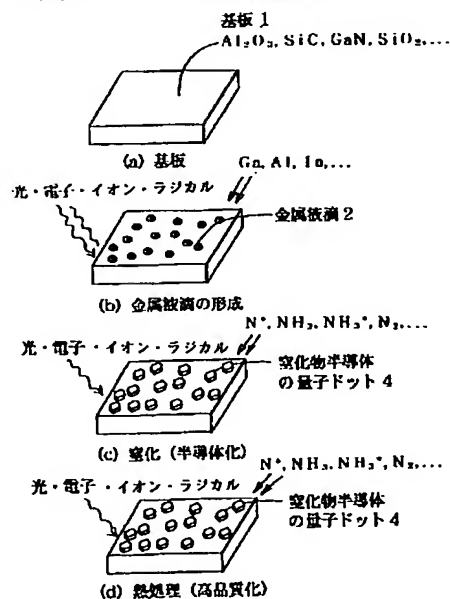
(54)【発明の名称】 位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法、量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造

(57)【要約】

位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体量子ドット形成プロセス

【課題】 GaN、InNあるいはAlNやInGaN、AlGaNなどの窒化物半導体の量子ドットを位置制御して形成することができるようにする。

【解決手段】 位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法であって、金属原料の表面エネルギーよりも低い表面エネルギーを持つ該基板の表面に、外部場を加えることによって該基板の該表面状態を変調して該表面を改質する第一の処理と、上記第一の処理により上記表面を改質された上記基板に上記金属原料を供給し、上記表面の改質された場所に結晶成長により金属液滴を形成する第二の処理と、上記第二の処理により上記金属液滴を形成された上記基板上に窒素ソースを供給し、上記金属液滴を窒化して窒化物半導体の量子ドットを形成する第三の処理とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法であって、金属原料の表面エネルギーよりも低い表面エネルギーを持つ該基板の表面に、外部場を加えることによって該基板の該表面状態を変調して該表面を改質する第一の処理と、

前記第一の処理により前記表面を改質された前記基板に前記金属原料を供給し、前記表面の改質された場所に結晶成長により金属液滴を形成する第二の処理と、前記第二の処理により前記金属液滴を形成された前記基板上に窒素ソースを供給し、前記金属液滴を窒化して窒化物半導体の量子ドットを形成する第三の処理とを有する位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項2】 請求項1に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、さらに、

前記第三の処理により形成された窒化物半導体の量子ドットを、所定の温度で所定の時間だけ熱処理する第四の処理とを有する位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項3】 請求項1または請求項2のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、前記第三の処理は、低温で前記金属液滴を形成された前記基板に窒素ソースを供給し始めて前記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後窒化中に温度を上げて結晶化を促進するものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項4】 請求項3に記載の位置制御された位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、

前記第三の処理は、低温で前記金属液滴を形成された前記基板に窒素ソースを供給し始めて前記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後窒化中に温度を上げて結晶化を促進する際に、外部場を加えて結晶化を促進するものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項5】 請求項1または請求項2のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、前記第三の処理は、低温で前記金属液滴を形成された前記基板に窒素ソースを供給し始めて前記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後窒化中に低温のままで外部場を加えて結晶化を促進するものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項6】 請求項2、請求項3、請求項4または請求項5のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビ

タキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、

前記第四の処理は、熱処理する外部場を加えるものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項7】 請求項1、請求項2、請求項3、請求項4、請求項5または請求項6のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、

10 前記外部場は、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせであるものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項8】 請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6または請求項7のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、

20 前記金属原料は、III族の金属であるものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項9】 請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7または請求項8のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、

前記基板は、サファイア基板、炭化シリコン基板、石英基板、窒化ガリウム基板またはフッ化カルシウム基板であるものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

30 【請求項10】 請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8または請求項9のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において、前記窒素ソースは、窒素、窒素ラジカル、アンモニアまたはアンモニアラジカルであるものである位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法。

【請求項11】 第1の量子単位をもつ第1の量子ドットと、

前記第1の量子単位とは異なる第2の量子単位をもつ第2の量子ドットとを有し、

トンネル効果により前記第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、前記第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとを近接して配置し、

さらに、電子が1個だけ存在するようにしたものである量子コンピュータにおける量子ビット素子構造において、

前記第1の量子ドットおよび前記第2の量子ドットは、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のい

れか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において形成されたものである量子コンピュータにおける量子ビット素子構造。

【請求項12】 第1の量子準位をもつ第1の量子ドットと、前記第1の量子準位より下の第2の量子準位をもつ第2の量子ドットとを有し、トンネル効果により前記第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、前記第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第1の量子ビット素子構造と、
第3の量子準位をもつ第3の量子ドットと、前記第3の量子準位より下の第4の量子準位をもつ第4の量子ドットとを有し、トンネル効果により前記第3の量子ドットと前記第4の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、前記第3の量子ドットと前記第4の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第2の量子ビット素子構造とを有し、
前記第1のビット素子構造と前記第2のビット素子構造とを、前記第1の量子ドットと前記第3の量子ドットとが対向するとともに、前記第2の量子ドットと前記第4の量子ドットとが対向するように配置し、
前記第1の量子ドットと前記第3の量子ドットとが電気的に接続され、
前記第2の量子ドットと前記第4の量子ドットとが電気的に接続され、
さらに、前記第1の量子準位と前記第2の量子準位との準位差と、前記第3の量子準位と前記第4の量子準位との準位差とが異なるように設定されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、
前記第1の量子ドット、前記第2の量子ドット、前記第3の量子ドットおよび前記第4の量子ドットは、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において形成されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造。

【請求項13】 請求項12に記載の量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、
前記第1の量子ドットと前記第3の量子ドットとは、第1の変容コンデンサを介して容量的に接続され、
前記第2の量子ドットと前記第4の量子ドットとは、第2の変容コンデンサを介して容量的に接続されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造。

【請求項14】 第1の量子準位をもつ第1の量子ドットと、前記第1の量子準位より下の第2の量子準位をもつ第2の量子ドットとを有し、トンネル効果により前記

第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、前記第1の量子ドットと前記第2の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第1の量子ビット素子構造と、

第3の量子準位をもつ第3の量子ドットと、前記第3の量子準位より下の第4の量子準位をもつ第4の量子ドットとを有し、トンネル効果により前記第3の量子ドットと前記第4の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、前記第3の量子ドットと前記第4の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第2の量子ビット素子構造とを有し、
前記第1のビット素子構造と前記第2のビット素子構造とを、前記第1の量子ドットと前記第4の量子ドットとが対向するとともに、前記第2の量子ドットと前記第3の量子ドットとが対向するように配置し、
前記第1の量子ドットと前記第4の量子ドットとが電気的に接続され、
前記第2の量子ドットと前記第3の量子ドットとが電気的に接続され、

さらに、前記第1の量子準位と前記第2の量子準位との準位差と、前記第3の量子準位と前記第4の量子準位との準位差とが異なるように設定されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、
前記第1の量子ドット、前記第2の量子ドット、前記第3の量子ドットおよび前記第4の量子ドットは、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法において形成されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造。

【請求項15】 請求項14に記載の量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、
前記第1の量子ドットと前記第4の量子ドットとは、第1の変容コンデンサを介して容量的に接続され、
前記第2の量子ドットと前記第3の量子ドットとは、第2の変容コンデンサを介して容量的に接続されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造。

【請求項16】 請求項12、請求項13、請求項14または請求項15のいずれか1項に記載の量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、
前記第1の量子ビット素子構造は、第3の変容コンデンサを介して第1の単電子トランジスタに接続され、
前記第4の量子ビット素子構造は、第4の変容コンデンサを介して第2の単電子トランジスタに接続されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法、量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造に関し、さらに詳細には、例えば、量子力学の原理に基づいた量子計算を行うチューリング型の量子コンピュータを構成する際などにおいて必要とされるGa_{0.5}N_{0.5}（窒化ガリウム）、In_{0.5}N_{0.5}（窒化インジウム）あるいはAl_{0.5}N_{0.5}（窒化アルミニウム）などの単結晶やこれらの混晶（InGa_{0.5}N_{0.5}、AlGa_{0.5}N_{0.5}など）などによるIII-V族窒化物半導体の量子ドットを形成する際に用いて好適な位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法、その方法により形成された量子ドットを用いた量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造に関する。

【0002】

【発明の背景】従来より、半導体技術の分野においては、Ga_{0.5}N_{0.5}、In_{0.5}N_{0.5}あるいはAl_{0.5}N_{0.5}などのIII-V族窒化物半導体は、光学デバイス材料や電子デバイス材料などとして極めて有用であると期待されている。

【0003】ところで、上記したような窒化物半導体を集積回路などへ応用する場合には、窒化物半導体の量子構造として、直径が数十ナノメートル（nm）程度あるいはそれ以下の球体形状や、一辺が数十ナノメートル（nm）程度あるいはそれ以下の方体形状を備えた微小な量子ドットを形成する必要がある。

【0004】しかしながら、従来においては液滴エピタキシーによりガリウム砒素（GaAs）の量子ドットを形成する手法は提案されているが、現在までのところGa_{0.5}N_{0.5}、In_{0.5}N_{0.5}あるいはAl_{0.5}N_{0.5}やInGa_{0.5}N_{0.5}、AlGa_{0.5}N_{0.5}などの窒化物半導体の量子ドットを形成する手法は提案されておらず、窒化物半導体の量子ドットを形成する手法の案出が強く望まれているものであった。

【0005】ところで、近年、古典力学に基づいた既存のデジタル・コンピュータに対して、量子力学の原理に基づいた量子計算を行う量子コンピュータの概念が提唱されてきている。

【0006】こうした量子コンピュータを実現するためには、現在のデジタル・コンピュータのビットの概念に相当する量子ビットを実現するための量子ビット素子と、2個の量子ビットの演算を行う量子相関ゲート素子とが必要であることが現在までに判明している。

【0007】ここで、以降の説明の理解を容易にするために、量子ビットならびに量子相関ゲートについて説明しておくこととする。

【0008】古典力学の原理に基づく既存のデジタル・コンピュータにおいては、“0”と“1”による「ビット」に対して、アンド（AND）やオア（OR）などの論理ゲートを作用させることによって、加算やフーリエ

変換などの演算を行うことのできる回路を構築するようになされている。こうした「ビット」に対応する概念として、量子コンピュータにおいては「量子ビット」という概念が導入されている。

【0009】物質のミクロな性質を支配する量子力学によれば、電子などの粒子（この明細書においては、電子について説明する。）の状態は、いろいろな状態の重ね合わせで表される。即ち、量子力学においては、とりうることのできる状態が2つしかない場合には、そのエネルギーが大きい方の状態を「 $|1\rangle$ 」と表すとともに、そのエネルギーが低い方の状態を「 $|0\rangle$ 」と表すことにすると、電子の状態は $|1\rangle$ と $|0\rangle$ との重ね合わせ状態にあるものと言うことができる。こうした概念を、従来のビットに利用するのが、量子ビットの考え方である。

【0010】即ち、“0”か“1”かが確定的な従来のビットに対して、量子ビットでは、量子ビットの状態は“0”か“1”かのどちらとは言えず、ある確率で“0”の状態があり、また、ある確率で“1”の状態があると言えるだけである。即ち、このような状態が、重ね合わせ状態と称されているものである。

【0011】従って、量子ビットの物理的実態は、 $|1\rangle$ と $|0\rangle$ との2つの量子準位を備えた2準位系であると言える。

【0012】また、量子相関ゲートとは、上記したような2個の量子ビットの演算を行って量子ビットを操作するゲートであるが、その演算とは図1に示すようなものである。

【0013】即ち、量子相関ゲートは可換であり、ある状態の2個の量子ビットに作用して、他の状態の2個の量子ビットを得ることができるようにしたものである。

【0014】具体的には、図1（a）に概念的に示すように、量子相関ゲートは、量子相関ゲートによる作用を受ける前の2個の量子ビットのうち的一方（2個の量子ビットのうちの基準となる量子ビットであり、以下、「コントロールビット」と称する。）の状態を「A」とするとともに、量子相関ゲートによる作用を受ける前の2個の量子ビットのうちの他方（2個の量子ビットのうちの「コントロールビット」による影響を受ける量子ビットであり、以下、「ターゲットビット」と称する。）の状態を「B」とすると、量子相関ゲートの作用を受けた後の2個の量子ビットとして、図1（b）の真理値表に概念的に示すように、量子相関ゲートによる作用を受ける前のコントロールビットの状態と同じ状態たる「A」と、量子相関ゲートによる作用を受ける前のコントロールビットの状態たる「A」とターゲットビットの状態たる「B」との排他的論理和「X」を得ることができるものである。

【0015】そして、本願出願人は、上記したような量子ビットならびに量子相関ゲートを実現することのでき

る実質的な構成として、特願平10-232590号「量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造」(出願日:平成10年8月19日)を提案している。

【0016】この特願平10-232590号「量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造」に係る発明の原理は、直径が数十ナノメートル(nm)程度あるいはそれ以下の球体形状や、一辺が数十ナノメートル(nm)程度あるいはそれ以下の方体形状を備えた微小な2つの量子ドットを近接させて配置して、トンネル効果によって当該2つの量子ドットの間で電子を移動可能に、1個の電子を当該2つの量子ドットの間で行き来させて $|1\rangle$ と $|0\rangle$ との2つの状態にするものである。

【0017】ここで、上記した2つの量子ドットの距離は近ければ近いほど好ましいものであるが、こうした2つの量子ドットを形成する位置をリソグラフィの技術を用いて制御しようとする場合には、2つの量子ドットの距離を近接するにあたって技術的な限界があるため、2つの量子ドットを極めて近接した位置に制御して配置することを可能にした量子ドットの形成の手法の案出が強く望まれているものであった。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上記したような従来の技術に対する強い要望に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、GaN、InNあるいはAlNやInGa_N、AlGa_Nなどの窒化物半導体の量子ドットを位置制御して形成することができるようにして、それにより2つの窒化物半導体の量子ドットを極めて近接した位置に制御して配置することを可能にし、例えば、量子ビットならびに量子相関ゲートを実現することのできるようにした位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法を提供しようとするものである。

【0019】また、本発明は、上記した位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成された量子ドットを用いた量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造を提供しようとするものである。

【0020】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は、位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法であって、金属原料の表面エネルギーよりも低い表面エネルギーを持つ該基板の表面に、外部場を加えることによって該基板の該表面状態を変調して該表面を改質する第一の処理と、上記第一の処理により上記表面を改質された上記基板に上記金属原料を供給し、上記表面の改質された場所に結晶成長により金属液滴を形成する第二の処理と、上記第二の処理により上記金属液滴を形成された上記基板上に

窒素ソースを供給し、上記金属液滴を窒化して窒化物半導体の量子ドットを形成する第三の処理とを有するようにしたものである。

【0021】また、本発明は、上記した発明において、さらに、上記第三の処理により形成された窒化物半導体の量子ドットを、所定の温度で所定の時間だけ熱処理する第四の処理とを有するようにしたものである。

【0022】ここで、上記第三の処理においては、低温で上記金属液滴を形成された上記基板に窒素ソースを供給し始めて上記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後

に窒化中に温度を上げて結晶化を促進することができる。

【0023】また、上記第三の処理においては、低温で上記金属液滴を形成された上記基板に窒素ソースを供給し始めて上記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後

に窒化中に低温のままで外部場を加えて結晶化を促進することができる。

【0024】また、上記第三の処理においては、低温で上記金属液滴を形成された上記基板に窒素ソースを供給し始めて上記金属液滴の表面のみを窒化させ、その後

に窒化中に低温のままで外部場を加えて結晶化を促進することができる。

【0025】また、上記第四の処理においては、熱処理する外部場を加えるようにしてもよい。

【0026】また、上記外部場は、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせとすることができる。

【0027】また、上記金属原料は、III族の金属とすることができる。

【0028】また、上記基板は、サファイア基板、炭化シリコン基板、石英基板、窒化ガリウム基板またはフッ化カルシウム基板とすることができる。

【0029】また、上記窒素ソースは、窒素、窒素ラジカル、アンモニアまたはアンモニアラジカルとすることができる。

【0030】また、本発明は、第1の量子準位をもつ第1の量子ドットと、上記第1の量子準位とは異なる第2の量子準位をもつ第2の量子ドットとを有し、トンネル効果により上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにしたものである量子コンピュータにおける量子ビット素子構造において、上記第1の量子ドットおよび上記第2の量子ドットを、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成するようにしたものである。

【0031】また、本発明は、第1の量子準位をもつ第

1の量子ドットと、上記第1の量子準位より下の第2の量子準位をもつ第2の量子ドットとを有し、トンネル効果により上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第1の量子ビット素子構造と、第3の量子準位をもつ第3の量子ドットと、上記第3の量子準位より下の第4の量子準位をもつ第4の量子ドットとを有し、トンネル効果により上記第3の量子ドットと上記第4の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、上記第3の量子ドットと上記第4の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第2の量子ビット素子構造とを有し、上記第1の量子ビット素子構造と上記第2の量子ビット素子構造とを、上記第1の量子ドットと上記第3の量子ドットとが対向するとともに、上記第2の量子ドットと上記第4の量子ドットとが対向するように配置し、上記第1の量子ドットと上記第3の量子ドットとが電氣的に接続され、上記第2の量子ドットと上記第4の量子ドットとが電氣的に接続され、さらに、上記第1の量子準位と上記第2の量子準位との準位差と、上記第3の量子準位と上記第4の量子準位との準位差とが異なるように設定されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、上記第1の量子ドット、上記第2の量子ドット、上記第3の量子ドットおよび上記第4の量子ドットを、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成するようにしたものである。

【0032】ここで、上記第1の量子ドットと上記第3の量子ドットとは、第1の可変コンデンサを介して容量的に接続され、上記第2の量子ドットと上記第4の量子ドットとは、第2の可変コンデンサを介して容量的に接続されるようにしてもよい。

【0033】また、本発明は、第1の量子準位をもつ第1の量子ドットと、上記第1の量子準位より下の第2の量子準位をもつ第2の量子ドットとを有し、トンネル効果により上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、上記第1の量子ドットと上記第2の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第1の量子ビット素子構造と、第3の量子準位をもつ第3の量子ドットと、上記第3の量子準位より下の第4の量子準位をもつ第4の量子ドットとを有し、トンネル効果により上記第3の量子ドットと上記第4の量子ドットとの間を電子が自由に移動可能なように、上記第3の量子ドットと上記第4の量子ドットとを近接して配置し、さらに、電子が1個だけ存在するようにした第2の量子ビット素子構造とを有し、上記第1の量子ビット素子構造と上記第2の

ビット素子構造とを、上記第1の量子ドットと上記第4の量子ドットとが対向するとともに、上記第2の量子ドットと上記第3の量子ドットとが対向するように配置し、上記第1の量子ドットと上記第4の量子ドットとが電氣的に接続され、上記第2の量子ドットと上記第3の量子ドットとが電氣的に接続され、さらに、上記第1の量子準位と上記第2の量子準位との準位差と、上記第3の量子準位と上記第4の量子準位との準位差とが異なるように設定されたものである量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造において、上記第1の量子ドット、上記第2の量子ドット、上記第3の量子ドットおよび上記第4の量子ドットを、請求項1、請求項2、請求項4、請求項5、請求項6、請求項7、請求項8、請求項9または請求項10のいずれか1項に記載の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成するようにしたものである。

【0034】ここで、上記第1の量子ドットと上記第4の量子ドットとは、第1の可変コンデンサを介して容量的に接続され、上記第2の量子ドットと上記第3の量子ドットとは、第2の可変コンデンサを介して容量的に接続されるようにしてもよい。

【0035】また、上記第1の量子ビット素子構造は、第3の可変コンデンサを介して第1の単電子トランジスタに接続され、上記第4の量子ビット素子構造は、第4の可変コンデンサを介して第2の単電子トランジスタに接続されるようにしてもよい。

【0036】

【発明の実施の形態】以下、添付の図面に基づいて、本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法、量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造の実施の形態の一例を詳細に説明するものとする。

【0037】ここで、図2(a)(b)(c)(d)には、本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法の実施の形態の一例の概念説明図が示されている。

【0038】以下、この図2(a)(b)(c)(d)を参照しながら、本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法の実施の形態の一例を詳細に説明する。

【0039】(1)基板：図2(a)参照

本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法においては、基板1上に窒化物半導体の量子ドット4(図2(c)(d)参照)を形成するものである。

【0040】ここで、基板1は、窒化物半導体の量子ドット14の原料となる、例えば、Ga(ガリウム)、Al(アルミニウム)、インジウム(In)などのIII族の金属(なお、本明細書においては、窒化物半導体の量子ドット4の原料となる金属を「金属原料」と適宜に

称することとする。)を基板1上に三次元成長することができるよう、これらの金属原料の表面エネルギーよりも低い表面エネルギーを持つものとする。つまり、金属原料の方が、基板1よりも表面エネルギーが高くなるようにするものである。

【0041】こうした金属原料の表面エネルギーよりも低い表面エネルギーを持つ基板1としては、例えば、基板1の原料(なお、本明細書においては、基板1の原料を「基板原料」と適宜に称することとする。)として Al_2O_3 (サファイア)、 SiO_2 (石英)、 SiC 10 (炭化シリコン)、 GaN (窒化ガリウム)、 CaF_2 (フッ化カルシウム)などのフッ化物などを用いたものがあげられる。

【0042】即ち、基板の表面エネルギーよりも当該基板上に堆積させようとする金属の表面エネルギーの方が高ければ、系のエネルギーを最小にしようとする作用が起こるために、当該基板上に堆積させようとする金属は表面積を最小にするように球状に変化しながら成長する。なお、こうした成長様式をフォルマーウェーバ(Volmer-Weber)様式(V-W様式)と称して 20 いる。

【0043】一般に、金属は半導体や絶縁体に比べて表面エネルギーが高いため、微細な三次元構造を形成する上で有利であり、上記した金属原料たる Ga 、 Al 、 In などの金属も、上記した基板原料たる Al_2O_3 、 SiC 、 SiO_2 、 GaN 、 CaF_2 などの半導体、絶縁体に比較して表面エネルギーが高い。

【0044】なお、金属原料と基板原料との組み合わせとしては、形成させる半導体と基板との格子定数整合性と電子の閉じ込めという理由から、例えば、金属原料が 30 Ga である場合には基板原料を AlN とし、金属原料が Al である場合には基板原料を CaF_2 とし、金属原料が In である場合には基板原料を GaN とすることが好ましい。

【0045】また、金属原料を三次元成長させる基板としては、上記した Al_2O_3 基板、 SiO_2 基板、 GaN 基板、 CaF_2 基板などのヘテロ基板を用いることもできる。

【0046】なお、上記したヘテロ基板を用いた場合には、既存の Si 集積回路や $GaAs$ 集積回路との集積化可能という点で、サファイア基板、石英基板、窒化ガリウム基板、フッ化カルシウム基板などを用いる場合よりも有効である。

【0047】例えば、基板10としては、 Si (シリコン)基板上に CaF_2 をエピタキシャル成長させたものを用いることができる。

【0048】 CaF_2 は、 $Si(111)$ 基板上において良好にエピタキシャル成長できる結晶性の絶縁物であり、特に、その(111)最表面ではフッ素イオンで終端されているために、表面エネルギーが極めて低いとい 50

う特徴を有している。

【0049】なお、 $Si(111)$ 基板上に CaF_2 をエピタキシャル成長させた基板1としては、例えば、分子線エピタキシー(MBE)法により $Si(111)$ 基板上に成長温度800℃で CaF_2 を20nm成長させたものを用いることができる。

【0050】(2)金属液滴の形成:図2(b)参照(2-1)上記「(1)基板:図2(a)参照」において説明された基板1上に、金属原料として、例えば、 Ga 、 Al 、 In などのIII族の金属をMBE法あるいは有機金属気相成長(MOCVD)法などにより供給することにより、基板1上に結晶成長により金属液滴2を形成する。

【0051】ここで、基板1の表面に光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えることによって当該基板1の表面状態を任意に変調することにより、当該基板1の表面が改質されて、その結果形成される吸着に対するポテンシャルの最も低いところに、優先的に金属原料の供給に伴う結晶成長における核成長が行われることになり、金属液滴2を形成する位置を制御することができるようになる。

【0052】例えば、上記「(1)基板:図2(a)参照」において説明した $Si(111)$ 基板上に CaF_2 をエピタキシャル成長させた基板1について説明すると、電子ビームを用いて CaF_2 の表面状態を任意に変調することにより、当該基板1の表面が改質されて、その結果形成される吸着に対するポテンシャルの最も低いところに優先的に核成長が行われるものである。

【0053】この点につき、図3(a)(b)(c)に示す電子ビーム照射による基板表面の改質の原理の説明図を参照しながら説明すると、図3(a)には CaF_2 の表面構造が示されているが、 CaF_2 結晶の表面はFイオンで終端されており、表面エネルギーは金属、半導体に比べて低く、未結合手が表面に出ていないため、堆積物質が核形成し難い(図3(a)においては、簡便のためにCaイオンは図示を省略している。))。

【0054】こうした CaF_2 結晶などのフッ化物に電子などの荷電粒子を照射すると、表面からFイオンが脱離する。例えば、図3(b)に示すように、 CaF_2 結晶に対してAs(砒素)雰囲気中で電子ビームを照射すると、電子によるオージェ過程を伴うFイオンの脱離現象のため表面からFイオンが脱離する。

【0055】このFイオンが脱離した場所は活性化のため、As原子を取り込む結果として表面がAsで置換されて改質される。即ち、As雰囲気中で電子ビームを CaF_2 上に照射することで、最表面のFイオンを脱離させ1原子層のAsに置換することができ、これにより表面の改質が行われる。

【0056】なお、 CaF_2 結晶に電子ビームを照射する際には、必ずしもAs雰囲気中で行う必要はなく、P

(リン)雰囲気中だと表面がPで置換されて改質され、また、電子ビーム露光装置内であるならば、表面が残留炭素によって置換されて改質される。

【0057】そして、図3(c)に示すように、上記のようにして表面を改質したCaF₂結晶の表面に対して金属原料としてGaを供給すると、CaF₂結晶の表面が改質された領域は表面エネルギーが増加する結果、Gaが選択的に集まるようになる。Gaは表面エネルギーが高いため、球状に凝集して核成長が行われてGaの金属液滴2が形成される。

【0058】ここで、図4(a)(b)(c)に示したAs膜を堆積したCaF₂上への電子ビームの照射と自然形成法によるGaの金属液滴2の位置制御の処理の概念図を参照しながら、本願出願人による金属液滴2の形成プロセスの実験の一例を説明する。

【0059】まず、Si(111)基板をMBE装置内に配置して、Si(111)基板上にMBE法でCaF₂を20nm成長させ、続いてAs₂分子線を用いて表面に30nmのAsを堆積した。

【0060】次に、上記のようにして処理したSi(111)基板をMBE装置から取り出して、取り出したSi(111)基板を電子ビーム露光システム内に配置して、電子ビーム露光システムを用いてスポット露光を周期的なアレイパターンで行い、表面改質領域を形成した(図4(a)参照)。

【0061】それから、表面改質領域を形成したSi(111)基板を電子ビーム露光システムから取り出して、取り出したSi(111)基板を表面クリーニングを行った後、再びMBE装置内に配置して、基板温度50℃で過剰なAsを蒸発除去し、最後に基板温度50℃で金属原料たるGaを供給して表面改質領域に吸着させ(図4(b))、これを膜厚換算で1nm乃至2nm堆積してGaの金属液滴2たるGa液滴を形成した(図4(c))。

【0062】図5は、上記において図4(a)(b)(c)を参照しながら説明した実験の結果を示す走査型顕微鏡(SEM)写真であり、Ga液滴の間隔を150nmとし、電子ビームの照射量を0.4pC/dotとした場合を示している。

【0063】この図5のSEM写真に示されているように、電子ビームの露光位置に1個ずつGa液滴が形成されている。

【0064】なお、図4(a)(b)(c)を参照しながら説明した手法のように、As膜を堆積したCaF₂上へ電子ビームの照射を行うと、金属膜中の電子の前方散乱のため、どんなに細く絞った電子ビームを用いてもCaF₂表面へ届くまでにぼけてしまい、原理的には微細な構造を得ることは困難である。

【0065】そこで、As膜を用いなくて表面改質を行うことを可能とし、微細な構造を得ることができるよう

にした手法として、図6(a)(b)(c)を参照しながら説明する手法がある。

【0066】即ち、図6(a)(b)(c)に示した真空中でのCaF₂上への電子ビームの照射と自然形成法によるGaの金属液滴2の位置制御の処理の概念図を参照しながら、本願出願人による金属液滴2の形成プロセスの実験の一例を説明する。

【0067】まず、Si(111)基板をMBE装置内に配置して、Si(111)基板上にMBE法でCaF₂を20nm成長させた。

【0068】次に、上記のようにして処理したSi(111)基板をMBE装置から取り出して、取り出したSi(111)基板を電子ビーム露光システム内に配置して、電子ビーム露光システムを用いてスポット露光を周期的なアレイパターンで行い、表面改質領域を形成した(図6(a)参照)。CaF₂表面は、電子ビーム露光装置内の残留炭素により表面改質されるものと考えられる。

【0069】それから、表面改質領域を形成したSi(111)基板を電子ビーム露光システムから取り出して、取り出したSi(111)基板を再びMBE装置内に配置して、基板温度500℃で金属原料たるGaを供給して表面改質領域に吸着させ(図6(b))、これを膜厚換算で1nm乃至2nm堆積してGaの金属液滴2たるGa液滴を形成した(図6(c))。

【0070】図7(a)(b)(c)は、上記において図6(a)(b)(c)を参照しながら説明した実験の結果を示す走査型顕微鏡(SEM)写真であり、Ga液滴の間隔をそれぞれ20nm(図7(a))、17nm(図7(b))、14nm(図7(c))とし、電子ビームの照射量を5pC/dotとした場合を示している。

【0071】この図7(a)(b)(c)のSEM写真に示されているように、電子ビームの露光位置に1個ずつGa液滴が形成されている。

【0072】次に、図8を参照しながら、Alの核形成を用いるAl/Gaの二段階堆積法について説明する。

【0073】即ち、金属液滴12の形成は、「核形成」、「成長」および「合体」の3つの過程に分類できるものであり、金属液滴12はその後、「成長」と「合体」とを繰り返す、その寸法が大きくなる一方で密度は低くなり、また、各金属液滴12の間の間隔も広くなる。

【0074】ところで、量子コンピュータを実現するためには、上記したように2つの量子ドットを極めて近接した位置に制御して配置することが望まれている。即ち、トンネル効果によって2つの量子ドットの間で電子を移動可能にするには、当該2つの量子ドットの間を極めて狭く、例えば、1nm乃至3nmとすることが好ましい。

【0075】この図8を参照しながら説明する二段階堆積法によれば、量子ドットの間を極めて狭く、例えば、1 nm乃至3 nmとすることが可能になる。

【0076】即ち、図8を参照しながら説明する二段階堆積法は、金属によって融点がそれぞれ異なることを利用するものであり、まず、A1を350℃で微量堆積させておき、高密度（なお、密度は、堆積量に逆比例する。）の成長核を形成させる。

【0077】その後、基板温度を30℃に下げること
10 A1を固定し、それからGaを供給する。このとき、A1はGaの成長核として働く。

【0078】制御不十分で金属液滴同士がくっついても核は動きにくいので、金属液滴間の間隔を極めて狭く維持できる。

【0079】従って、この二段階堆積法は、微細なドットアレイを形成する上で、重要な手法である。

【0080】以上において説明したように、基板1の表面に光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えることによって、例えば、基板1の表面を集束電子ビームで照射することによ
20 って、表面ポテンシャルの変調を用いて表面状態の局所的な改質を行い、その改質をした場所に金属液滴を配置することが可能となる。

【0081】ここで、金属原料の温度を所定の温度、例えば、「600℃乃至1500℃」に制御し、基板1の温度を所定の温度、例えば、「-10℃乃至1500℃」に制御し、金属原料の堆積量を所定の堆積量、例えば、「 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 以下」に制御することにより、後述する基板1上における金属原料の原子の結晶成長の原理に基づいて、金属液滴2の寸法および密度を制
30 御することができる。

【0082】本願出願人の実験によれば、具体的には、例えば、金属原料がGaであり、基板1がCaF₂である場合には、金属原料の温度を800℃とし、基板1の温度を30℃とし、金属原料の堆積量を $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ とすることにより、金属液滴の寸法を7 nmに制御するとともに密度を $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ に制御することができることが判明した。

【0083】また、本願出願人の実験によれば、例えば、金属原料がAlであり、基板1がCaF₂である場
40 合には、金属原料の温度を1060℃とし、基板1の温度を350℃とし、金属原料の堆積量を $7.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ とすることにより、金属液滴の寸法を7 nmに制御するとともに密度を $9 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ に制御することができることが判明した。

【0084】ここで、結晶成長初期の核生成には、均一核生成と不均一核生成とに大別することができる。以下、均一核生成と不均一核生成とについて説明する。

【0085】(2-2) まず、金属液滴2を形成する際
50 に均一核生成を用いる場合には、供給する金属原料の温

度はより低い方が、原子のマイグレーション（拡散）のエネルギーが低いので原子同士が基板1上で合体する確率が減り、原子が基板1に到達した場所で核生成するため、基板1上に高密度で金属液滴2を形成させることができる。

【0086】また、原子がマイグレーションするためのエネルギーは基板1からもやりとりが可能であるので、基板1の温度を下げた方が基板1上に高密度で金属液滴2を形成させることができる。

【0087】そして、金属液滴2の構造の寸法は、金属原料の堆積量に依存している。即ち、基板1上のある一点で核生成がおり、その核が結晶成長して金属液滴2が形成される場合には、金属液滴2の構造の寸法は金属原料の堆積量で定まるものである。

【0088】ただし、実際には、基板1上において核同士が結晶成長中に合体したり、消滅したりするため、個々の金属原料に対して金属液滴2の構造の寸法を厳密に予想することはできない。

【0089】しかしながら、全体の平均的な傾向としては、金属原料の堆積量を増加すると、金属液滴2の密度は下がるがその寸法は大きくなる方向にあるため、量子効果が顕著に現れるような微細な構造を高密度で形成させる場合には、金属原料の堆積量を少なくして（例えば、金属原料の堆積量を $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 程度にする。）、金属原料および基板1の温度を現実的な範囲で下げるのが望ましい。

【0090】なお、金属原料および基板1の温度を下げる領域に関しては、金属原料の種類に応じて大きく異なるが、例えば、CaF₂ 基板上に金属原料としてGaを供給する場合には、CaF₂ 基板の温度を「-10℃程度」とし、Gaの温度を「800℃程度」とする。また、CaF₂ 基板上に金属原料としてAlを供給する場合には、CaF₂ 基板の温度を「350℃程度」とし、Alの温度を「1100℃程度」とする。

【0091】(2-3) 次に、不均一核生成の場合について説明すると、この不均一核生成においては上記した均一核生成とは異なる核生成が行われる。

【0092】即ち、不均一核生成は、基板表面の欠陥や不純物を成長核として結晶成長が起こるものである。

【0093】従って、基板1の表面に欠陥や不純物を配置してやれば、これら欠陥や不純物を中心として、後述するような条件の下で核生成が実現可能となる。

【0094】ここで、基本的には、均一核生成と不均一核生成とでは、核生成の速度は不均一核生成の方が極めて速いことが知られている。

【0095】ところで、不均一核生成の場合には、基板1上に配置させた核の間に、均一核生成で新たな成長核が生成されないようにするために、原子のマイグレーション・エネルギーをある程度高める必要がある。従って、金属原料の温度および基板1の温度を高くする必要

がある。

【0096】ただし、金属原料の温度および基板1の温度を高くしすぎると、金属原料の再蒸発のため、核生成がおこらなくなる。

【0097】上記した不均一核生成の場合には、核密度および形成場所は基板1上の欠陥や不純物の個数およびその場所で決定され、金属液滴2の構造の寸法は、金属原料の堆積量が多くなればなるほど大きくなる。

【0098】例えば、金属原料の基板1に対する付着係数を「1」とすれば、単位面積あたりの金属原料の堆積量を単位面積あたりの不純物核の個数で除算したものが、1個の金属液滴2がしめる原子数になる。

【0099】本願出願人の実験によれば、例えば、基板1としてCaF₂基板を用いるとともに、金属原料としてGaを用いた場合には、基板温度が30℃の場合に核生成が行われるが、基板温度を200℃に上昇するとGaの再蒸発が顕著になって核生成が行われなくなる。

【0100】また、本願出願人の実験によれば、基板1としてCaF₂基板を用いるとともに、金属原料としてAlを用いた場合には、基板温度が350℃の場合に核形成が行われるが、基板温度を500℃に上昇するとAlの再蒸発が顕著になって核生成が行われなくなる。

【0101】また、本願出願人の実験によれば、成長核として電子ビームにより表面改質した領域を用い、基板1としてCaF₂基板を用いるとともに、金属原料としてGaを用いた場合には、基板温度が500℃の場合に核生成が行われるが、それ以上でもそれ以下でも核形成を行うことが困難であることが明らかになった。

【0102】なお、上記した本願出願人の各実験においては、Gaの温度は800℃とし、Alの温度は1060℃とした。

【0103】上記したように、金属原料の供給前に、予め異種原子を不純物として基板1に照射することによって、金属液滴2の形成核位置および核密度を制御することができるものである。

【0104】(3)窒化(半導体化):図2(c)参照
上記した「(2)金属液滴の形成:図2(b)参照」の処理を終了すると、基板温度を金属液滴を形成させた温度に維持したまま、窒素ソースとして窒素(N₂)、窒素ラジカル(N^{*})、アンモニア(NH₃)あるいはアンモニアラジカル(NH₃^{*})などを照射し始め、基板1上に形成された金属液滴2の窒化を行う。

【0105】このようにして金属液滴2が窒化されることにより、窒化物半導体の量子ドット4が得られる。

【0106】このときに、金属液滴2の結晶化を促進するためには、基板温度を金属液滴を形成させた温度から300℃乃至1000℃程度まで徐々に上昇させたり、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えればよい。

【0107】温度の設定範囲は、基板と金属の組み合わせ

せによって適宜定める必要がある。例えば、サファイヤ基板上のGa₂Nでは、基板温度を300℃乃至600℃程度に上昇させる。

【0108】ここで、上記した「(2)金属液滴の形成:図2(b)参照」の処理により基板1上に形成させたGaなどの金属液滴2は、超高真空中で温度を上げると表面拡散が顕著になって、それぞれの金属液滴2が合体して大きくなってしまい、金属液滴2の基板1における密度を下げたり、あるいは、せっかく形成させた金属液滴2が膜になってしまったりする。

【0109】こうした現象を抑制するためには、上記した窒素(N₂)、窒素ラジカル(N^{*})、アンモニア(NH₃)あるいはアンモニアラジカル(NH₃^{*})などによる窒化プロセスを可能な限り低温で行う必要がある。

【0110】ただし、上記した窒化プロセスを低温で行うだけでは、金属原料と窒素との結晶化のための化学エネルギーや窒素の金属原料中への拡散のエネルギーが不十分であるため、結晶性が不十分となって、発光デバイス材料や電子デバイス材料として実際に用いるには十分ではないと考えられる。

【0111】従って、低温(温度は、金属原料と基板原料との組み合わせにより大きく異なるが、例えば、金属原料がGaであり、基板原料がCaF₂である場合には温度は30℃であり、金属原料がAlであり、基板原料がCaF₂である場合には温度は350℃である。)で金属液滴2を形成された基板1に窒素を供給し始めて、まず、金属液滴2の表面のみを窒化させておいて、その後窒化中に温度を上げて結晶化を促進したり、温度は低いまま、または温度を上げながら光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えて結晶化を促進したりすることが効果的であると考えられる。

【0112】光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせが持つエネルギーを金属液滴2に照射しながら該金属液滴2を窒化させることで、基板1の温度を上昇させることなく結晶化に必要なエネルギーを与えることが可能となる。

【0113】また、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えることにより期待される他の効果としては、光の場合には、光学的に透明な基板1を用いれば金属のみに選択的にエネルギーを加えることが可能であるため、低い基板温度の場合は極めて表面拡散を抑制してサイズをほとんど変化させずに結晶化が可能である。

【0114】また、電子の場合には、電子の非弾性散乱断面積の小さな基板1を用いれば、上記した光の場合と同様に、ほぼ金属のみに選択的にエネルギーを加えることが可能であるため、低い基板温度の場合は極めて表面拡散を抑制してサイズをほとんど変化させずに結晶化が

可能である。

【0115】なお、窒化を行うための窒素ソースとしては、窒素ガスやアンモニアガスではなく、金属と反応性の高い窒素ラジカルやアンモニアラジカルを用いることにより、化学反応の速度を上げることが可能であるため、窒素ガスやアンモニアガスを用いる場合と比較すると、短時間かつ低温で結晶化が可能である。

【0116】(4) 熱処理 (高品質化) : 図2 (d) 参照

上記した「(3) 窒化 (半導体化) : 図2 (c) 参照」における窒化プロセスにより得られた窒化物半導体の量子ドット4の高品質化のため、窒素 (N_2)、窒素ラジカル (N^*)、アンモニア (NH_3) あるいはアンモニアラジカル (NH_3^*) の減圧あるいは大気雰囲気中において、所定の温度、例えば、500℃乃至1500℃程度の高温で所定の時間、例えば、10分間だけ熱処理を行う。

【0117】温度設定範囲は、基板と金属の組み合わせによって、適宜定める必要があるが、サファイヤ基板上のGa₂Nでは、1000℃程度の高温で熱処理を行う。

【0118】また、上記した熱処理を行う際に、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えながら行うようにしてもよく、その場合には、プロセス温度の低温化や窒化分半導体の量子ドット4へ選択的にエネルギーを加えられるという効果がある。

【0119】このように、窒化物半導体の量子ドット4を500℃乃至1500℃程度の高温で熱処理すると、窒化物半導体の量子ドット4の結晶の品質を向上することができる。

【0120】なお、上記「(3) 窒化 (半導体化) : 図2 (c) 参照」において説明したように、超高真空中で加熱した場合には表面拡散が顕著になり、窒化物半導体の量子ドット4の微細構造が実現不可能になるため、大気中や減圧 (超高真空中ではない) または加圧しながら熱処理を行う必要がある。

【0121】このように圧力を上げて熱処理する結果として、Gaなどの金属原子と窒素ガスやアンモニアガスなどの分子および原子との衝突が顕著になり、表面拡散を抑制しながら温度を上げることができるようになるため、良質の量子ドット構造を得ることができるようになる。

【0122】なお、光、電子、イオンまたはラジカル、あるいはそれらの組み合わせさらには窒素ラジカルやアンモニアラジカルを用いる理由に関しては、上記

「(3) 窒化 (半導体化) : 図2 (c) 参照」の窒化プロセスにおいて説明したと同様の理由によるものであるため、その詳細な説明は省略する。

【0123】この熱処理を経て、最終的に良質な窒化物半導体の量子ドット14を形成することができるもので

ある。

【0124】次に、本願出願人によって行われた実験、即ち、液滴エビタキシーにより窒化物半導体の量子ドット4としてGa₂N量子ドットを形成する実験ならびにその実験結果について詳細に説明するものとする。

【0125】なお、本実験の概要を説明すると、基板1としてAl₂O₃基板 (サファイヤ基板) を用いるとともに金属原料としてGaを用い、サファイヤ基板上にGaの金属液滴2を形成した後に、アンモニア (NH_3) ガスを照射してGaの金属液滴2を窒化して、窒化物半導体の量子ドット4としてGa₂N量子ドットを形成し、さらにこのGa₂N量子ドットを熱処理して、サファイヤ基板上に良好なGa₂N量子ドットを作製するものである。

【0126】(1) Ga₂N量子ドット構造の形成

即ち、本願出願人による実験においては、ガスソース分子線エビタキシー (GSMBE) 法を用いて、サファイヤ (0001) 基板上にGa₂N量子ドットを形成させた。つまり、III族原料として固体ガリウム (Ga) を用い、V族原料としてアンモニア (NH_3) ガスを用いた。

【0127】基板1としては、有機洗浄の後に10%のフッ化水素水中で20分間の超音波洗浄を施し、窒素 (N_2) ガスで乾燥させたものを用いた。

【0128】まず、基板1をGSMBE装置に搬送した後に、基板1の表面を真空中において超高速電子回折 (RHEED) 法を用いて平坦な表面を示すパターンが観測されるまで、800℃で加熱クリーニングした。

【0129】この後に、基板温度を300℃に下げ、金属Ga分子線を $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ だけ超高真空中で基板1に供給して、基板1上にGaの金属液滴2を形成した。

【0130】それから、基板温度300℃でアンモニア (NH_3) ガスを供給しはじめて、金属液滴2の表面のみを窒化させておいて、徐々に基板の温度を上げて行き、最終的には600℃まであげ、基板1上に形成されたGaの金属液滴2の窒化を行うとともに結晶化を促進し、窒化物半導体の量子ドット4としてGa₂N量子ドットを得た。

【0131】なお、基板1は、RHEED観察によりGa₂Nの結晶化を示すリングパターンが表れるまで加熱した。

【0132】(2) Ga₂N量子ドットの熱処理

上記した「(1) Ga₂N量子ドット構造の形成」の処理の後に、基板1をGSMBE装置から取り出し、有機金属気相堆積 (MOCVD) 装置内において、760 Torrの窒素 (N_2) とアンモニア (NH_3) との混合ガス雰囲気中で1000℃で10分間熱処理を行い、結晶の高品質化を図った。

【0133】こうして液滴エビタキシーにより、サファ

イア(0001)基板の上に良質なGa_{0.9}N量子ドットが形成された。

【0134】(3) 実験結果

(3-1) 金属液滴2が窒化物半導体の量子ドットになったことの確認

RHEEDパターンは、Ga_{0.9}Nと同様の格子定数のリングパターンを示した。また、原子力顕微鏡(AFM)で金属液滴とは異なり、むしろGa_{0.9}Nの安定化構造の六角柱構造に近い構造を示した。従って、Gaが窒化されてGa_{0.9}Nになったものと認められる。

【0135】さらに、Ga_{0.9}N量子ドットからは、フォトルミネッセンス(PL)が室温で赤く発光した(半導体は発光するが、金属は発光しない)。

【0136】また、六角柱構造のGa_{0.9}N量子ドットの最も小さいものの寸法は、直径が5nmであり、高さは2nmであった。

【0137】こうした実験結果をさらに詳細に説明すると、図9(a)には、基板1の温度を最終的には600℃まで昇温した際に得られたGa_{0.9}N量子ドットの表面のAFMの写真が示されている。また、図9(b)には、図9(a)に示されたGa_{0.9}N量子ドットの断面図が示されている。

【0138】図9(a)(b)に示されているように、基板1の表面におけるGa_{0.9}N量子ドットの直径は約5nm乃至20nmの範囲にあり、Ga_{0.9}N量子ドットの高さは約2nm乃至10nmである。

【0139】また、図9(a)に示す写真において同様のグレイスケールで示されている各Ga_{0.9}N量子ドットの六角形の頂上の領域は、Ga_{0.9}N量子ドットの形状が半球状というよりも六角柱であることを示している。

【0140】そして、600℃まで昇温した後にRHEEDの観察において見られたGa_{0.9}Nの格子定数のリングパターンは、AFMにおけるドットがGa_{0.9}N量子ドットであることを示している。

【0141】図10は、室温における図9(a)に示すGa_{0.9}N量子ドットのPLスペクトルを示している。このスペクトルは、「浜松ホトニクスシステム6551」によって測定されたものであり、検出器は赤色領域を高感度に感知するものである。PLのピークエネルギーは2.5eVであり、このGa_{0.9}N量子ドットは明るい赤色発光を示している。

【0142】このことは、図9(a)に示すGa_{0.9}N量子ドットの結晶化が十分でないことに起因するものと考えられる。即ち、600℃までの昇温では、液滴エピタキシーにおけるGa_{0.9}Nの結晶化には十分ではないものと考えられる。

【0143】(3-2) 1000℃、10分間の熱処理で良好なGa_{0.9}N量子ドットが形成できたことの確認
液体窒素温度(77K)でGa_{0.9}N薄膜よりも、高エネルギー側にPLのピークがシフトした。即ち、電子の量子

閉じこめ効果が確認できた。

【0144】即ち、図11(a)には、図9(a)に示すGa_{0.9}N量子ドットを1000℃で熱処理する前(before)と熱処理した後(after)とのPLスペクトルが示されている。これらのスペクトルは、77Kにおいて紫外感知光電子増倍管を使用して測定された。

【0145】この図11(a)に示す両方のスペクトルを比較すると、1000℃で熱処理の前においては3eVの光エネルギーの周辺で広くかつ低いピークがあり、その一方で、1000℃で熱処理の後においては3.58eVにおいて強いピークが表れている。

【0146】これは、図11(a)に示すGa_{0.9}N量子ドットの結晶の品質が、1000℃で熱処理によって改善された結果である。

【0147】図11(b)は、300nmの厚さのGa_{0.9}N膜と、図11(a)に示すGa_{0.9}N量子ドットを1000℃で熱処理した後のGa_{0.9}N量子ドットとに因して、77KにおけるPLスペクトルの比較を示している。

【0148】この図11(b)に示されているように、Ga_{0.9}N膜は3.45eVにバンド間発光のピークがあるが、一方、Ga_{0.9}N量子ドットは3.58eVにピークがあり、Ga_{0.9}N量子ドットでは液体窒素温度(77K)でGa_{0.9}N薄膜よりも高エネルギー側にPLのピークがシフトしている。

【0149】なお、Ga_{0.9}N量子ドットにおける130meVのブルーシフトは、量子ドットの形成による量子化されたシフトエネルギーであると考えられる。

【0150】なお、上記した実験は、金属原料としてGaを用いて窒化物半導体の量子ドット14としてGa_{0.9}N量子ドットを得るようにしたものであるが、金属原料としてAlを用いた場合には窒化物半導体の量子ドット4としてAl_{0.9}N量子ドットが得られ、金属原料としてInを用いた場合には窒化物半導体の量子ドット4としてIn_{0.9}N量子ドットが得られる。また、金属原料としてGa、Al、Inを適宜に混合して用いた場合には、これらの混晶が得られる。

【0151】また、上記したように、基板原料としては、SiO₂やGa_{0.9}Nなどのほかに、原理的に多くの材料が考えられる。

【0152】また、上記したように、窒化プロセスに関しては、窒素ラジカルやアンモニアラジカルを用いたり、圧力を変化させてもよく、また、高温での熱処理に関しては、単に温度を上げるだけでなく、光、電子、イオン、ラジカル、あるいはそれらの組み合わせなどの外部場を加えるようにしてもよい。

【0153】以上において詳細に説明したように、本発明の位置制御された液滴エピタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法を用いると、間隙を極めて近接させて配置した複数の窒化物半導体の量子ドット、例えば、Ga_{0.9}Nの量子ドットを形成することができるもの

である。

【0154】従って、本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法を用いて窒化物半導体の量子ドットを形成するようにした場合には、量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造を実現することができる。

【0155】以下、本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成された窒化物半導体の量子ドットを用いた量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造について説明する。

【0156】なお、以下の説明においては、「量子ドット」とは、上記した本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成された窒化物半導体の量子ドット、例えば、Ga Nの量子ドットである。

【0157】図12には、本発明による量子コンピュータにおける量子ビット素子構造の実施の形態の一例を示す概念構成説明図が示されている。

【0158】即ち、本発明による量子コンピュータにおける量子ビット素子構造10は、例えば、上記した本発明の位置制御された液滴エビタキシーによる窒化物半導体の量子ドットの形成方法により形成された2個の窒化物半導体の量子ドット、例えば、2個のGa Nの量子ドット12、14より構成されている。つまり、量子ビットの物理的実態は2準位系であるが、本発明による量子コンピュータにおける量子ビット素子構造10においては、2個の量子ドット12、14より2つの量子準位16、18を形成するようになされている。

【0159】より詳しく説明すると、例えば、Ga Nなどの半導体材料により、直径が数十ナノメートル(n m)程度あるいはそれ以下の球体形状や、一辺が数十ナノメートル(n m)程度あるいはそれ以下の立方体形状を備えた微小な量子ドットを構成すると、こうした量子ドットには離散化した量子準位が形成されることになる。

【0160】従って、量子ビットの2準位系として、注目する量子準位をその中に1つだけ有する微小な量子ドットを2つ用意し、これら2つの量子ドットを、量子ビット素子構造10を構成するための量子ドット12、14として用いるものである。

【0161】なお、これら量子ドット12の量子準位16と量子ドット14の量子準位18とは、互いに異なるように設定されるものであり、この実施の形態においては、図12上右側に位置する量子ドット12の量子準位16の方が、図12上左側に位置する量子ドット14の量子準位18より低いように設定されている。

【0162】具体的には、量子ドット12の量子準位16と量子ドット14の量子準位18との準位間のエネルギー差Eは、外部の電圧により自由に変えることができ

るものであり、この実施の形態においては、図12上右側に位置する量子ドット12の量子準位16の方が、図12上左側に位置する量子ドット14の量子準位18よりも低くなるように、外部の電圧により設定されているものである。

【0163】また、量子ドット12と量子ドット14とは、その間隔Gが、例えば、10オングストローム程度に近接して配置されるものであり、電子がトンネル効果により量子ドット12と量子ドット14との間を自由に移動することができるようになされている。

【0164】以上の構成において、量子ビット素子構造10内には、例えば、クーロンブロック効果を利用して、電子が1個存在するようになされており、その1個の電子は、ある確率で量子ドット12の量子準位16に存在(|0>の状態)したり、ある確率で量子ドット14の量子準位18に存在(|1>の状態)したりするものである。

【0165】なお、クーロンブロック効果とは、電子間のクーロン反発力を利用して、電子を1個だけ量子ドットに蓄えるためのメカニズムである。

【0166】ここで、ラビ振動の原理を利用することにより、量子ビット素子構造10の量子ビットの操作を行うことができるものである。

【0167】ここで、ラビ振動とは、2準位系において準位間のエネルギー差に共鳴した電磁波を照射すると、電子の2準位の上か下かに存在する確率が周期的に振動する現象である。

【0168】従って、量子ビット素子構造10において、例えば、初期状態として、上の量子準位18に電子が存在する確率(P1)が0(P1=0)であり、下の量子準位16に電子が存在する確率(P0)が1(P0=1)であるとする、量子準位18と量子準位16とのエネルギー差Eに共鳴した電磁波をラビ振動の半周期だけ照射した後は、上の量子準位18に電子が存在する確率(P1)が1(P1=1)となり、下の量子準位16に電子が存在する確率(P0)が0(P0=0)となるものである。

【0169】即ち、ラビ振動を利用することにより、量子ビットの状態を反転することができることになる。そして、上記した電磁波の照射時間を適当に選択することにより、量子ビットの状態を任意の制御することができるものである。

【0170】次に、図13ならびに図14を参照しながら、本発明による量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造の実施の形態の一例について説明する。

【0171】即ち、図13には、本発明による量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造の実施の形態の一例の概念構成説明図が示されている。

【0172】この量子相関ゲート100は、上記した本発明の実施の形態による量子ビット素子構造を2個用い

て構成されるものである。

【0173】具体的には、量子相関ゲート100は、2準位間のエネルギー差が異なる2個の量子ビット素子構造として、2準位間のエネルギー差が大きい第1量子ビット素子構造102と、2準位間のエネルギー差が小さい第2量子ビット素子構造104とを備えて構成されている。ここで、2準位間のエネルギー差が大きい方の第1量子ビット素子構造102の量子ビットをコントロールビットとし、2準位間のエネルギー差が小さい方の第2量子ビット素子構造104の量子ビットをターゲット

10 ビットとする。

【0174】なお、第1量子ビット素子構造102は、上の量子準位106をもつ量子ドット108と、下の量子準位110をもつ量子ドット112とより構成されている。

【0175】また、第2量子ビット素子構造104は、上の量子準位114をもつ量子ドット116と、下の量子準位118をもつ量子ドット120とより構成されている。

【0176】また、第1量子ビット素子構造102と第2量子ビット素子構造104とは、例えば、図13に示すように、量子ドット108と量子ドット116とが対向し、かつ、量子ドット112と量子ドット120とが対向するように上下2段に配置されているものである。なお、図13においては、第1量子ビット素子構造102が上段に配置され、第2量子ビット素子構造104が下段に配置されている。

【0177】そして、量子ドット108と量子ドット116とは、可変コンデンサ122を介して接続されており、量子ドット112と量子ドット120とは、可変コン

30 デンサ124を介して接続されている。

【0178】さらに、こうした量子相関ゲート素子構造100においては、第1量子ビット素子構造102の量子ドット112には、可変コンデンサ126を介して、第1量子ビット素子構造102による第1ビットの状態を検出するための単電子トランジスタが接続されており、また、第2量子ビット素子構造104の量子ドット120には、可変コンデンサ128を介して、第2量子ビット素子構造104による第2ビットの状態を検出するための単電子トランジスタが接続されている。

40 【0179】なお、図13に示す実施の形態においては、単電子トランジスタは、第1量子ビット素子構造102の量子ドット112に可変コンデンサ126を介して接続されるとともに、第2量子ビット素子構造104の量子ドット120に可変コンデンサ128を介して接続されているが、これに限られることなく、第1量子ビット素子構造102の量子ドット108に可変コンデンサ126を介して接続するようにしてもよいし、第2量子ビット素子構造104の量子ドット116に可変コン

【0180】以上の構成において、可変コンデンサ122の容量C1を0 ($C1=0$) に設定するとともに、可変コンデンサ124の容量C2を0 ($C2=0$) に設定すると、第1量子ビット素子構造102と第2量子ビット素子構造104とは互いに電氣的に独立した状態となる。

【0181】従って、上記したラビ振動を利用すれば、第1量子ビット素子構造102のコントロールビットの状態と、第2量子ビット素子構造104のターゲットビットの状態とを、図1(b)の真理値表に示す量子相関ゲートの作用前の状態に設定することができる。

【0182】図14には、こうした量子相関ゲートの作用前の状態における、第1量子ビット素子構造102の電子のエネルギーと第2量子ビット素子構造104の電子のエネルギーとの合計値を示すエネルギーレベル状態図が示されている。なお、量子準位110と量子準位118とにおける電子のエネルギーのレベルを、基準のレベルAとする。

【0183】従って、コントロールビットおよびターゲットビットの状態が $|0\rangle$ であるならば、エネルギーレベルは基準のレベルAとなる。

【0184】また、コントロールビットの状態が $|0\rangle$ であり、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ であるならば、エネルギーレベルはレベルBとなる。

【0185】さらに、コントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、ターゲットビットの状態が $|0\rangle$ であるならば、エネルギーレベルはレベルCとなる。

【0186】さらにまた、コントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ であるならば、エネルギーレベルはレベルDとなる。

【0187】ところが、可変コンデンサ122の容量C1を「 $C1 \neq 0$ 」に設定するとともに、可変コンデンサ124の容量C2を「 $C2 \neq 0$ 」に設定すると、第1量子ビット素子構造102と第2量子ビット素子構造104とは互いに容量的に結合した状態となる。

【0188】従って、「 $C1 \neq 0$ 」および「 $C2 \neq 0$ 」の場合には、図13に示す状態における第1量子ビット素子構造102の量子準位106、110および第2量子ビット素子構造104の量子準位114、118に関して、互いの電子が対角線上に存在するとき（コントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|0\rangle$ である場合およびコントロールビットの状態が $|0\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ である場合）には「 $C1=0$ 」および「 $C2=0$ 」の場合と比べてエネルギーはほとんど変化しないが、互いの電子が対角線上に存在しないとき（コントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ である場合およびコントロールビットの状態が $|0\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|0\rangle$ である場合）には「 $C1=0$ 」および「 $C2$

=0」の場合よりもエネルギーが上がることになる。その差を ΔE とすると、「 $C1 \neq 0$ 」および「 $C2 \neq 0$ 」の場合には、レベルAはレベルA'に上がり、レベルBはほとんどそのままレベルB'になり、レベルCはほとんどそのままレベルC'になり、レベルDはレベルD'に上がることになる。

【0189】従って、量子相関ゲート素子構造100に対して、「 $E2 + \Delta E$ 」のエネルギーをもつ電磁波をラビ振動の半周期間照射することによって、コントロールビットが $|1\rangle$ のときだけ、ターゲットビットを反転することができ、図1(b)に示す真理値表の動作を実現することができる。

【0190】なお、コントロールビットとターゲットビットとを単独で操作する必要がある場合には、上記したように「 $C1 = 0$ 」および「 $C2 = 0$ 」に設定して、コントロールビットとターゲットビットとの間の相互作用を小さくすればよい。

【0191】そして、量子相関ゲート素子構造100による演算後の量子ビットの状態を観測するには、可変コンデンサ126の容量C3を「 $C3 \neq 0$ 」に設定するとともに、可変コンデンサ128の容量C4を「 $C4 \neq 0$ 」に設定して、単電子トランジスタを用いることになる。なお、演算中は単電子トランジスタを用いず、「 $C3 = 0$ 」ならびに「 $C4 = 0$ 」に設定されているものとする。

【0192】上記したように、第1量子ビット素子構造102ならびに第2量子ビット素子構造104には、それぞれ1個の電子しか存在しないので、1個の電子の電荷を測定することが必要であり、これは既存のエレクトロメータでは不可能であるので、この実施の形態においては、単電子トランジスタを用いるようにしている。

【0193】なお、本発明における量子相関ゲート素子を構成する各量子ビット素子における各量子ドットの準位の上下関係、換言すれば、各量子ドットの配置関係は、上記した実施の形態に限定されるものではないことは勿論である。

【0194】即ち、図13に示すような配置関係に代えて、図15に示すように、第1量子ビット素子構造102と第2量子ビット素子構造104とを、量子ドット108と量子ドット120とが対向し、かつ、量子ドット112と量子ドット116とが対向するように上下2段に配置するようにしてもよい。なお、図15においては、第1量子ビット素子構造102が上段に配置され、第2量子ビット素子構造104が下段に配置されている。

【0195】そして、量子ドット108と量子ドット120とを、可変コンデンサ124を介して接続し、量子ドット112と量子ドット116とを、可変コンデンサ122を介して接続する。

【0196】なお、図15示す量子相関ゲート素子構造

100においては、第1量子ビット素子構造102の量子ドット108に、可変コンデンサ126を介して、第1量子ビット素子構造102による第1ビットの状態を検出するための単電子トランジスタが接続され、また、第2量子ビット素子構造104の量子ドット120に、可変コンデンサ128を介して、第2量子ビット素子構造104による第2ビットの状態を検出するための単電子トランジスタが接続されている。

【0197】従って、この図15に示す実施の形態においては、エネルギーレベル状態図は図16に示すようになる。

【0198】即ち、「 $C1 \neq 0$ 」および「 $C2 \neq 0$ 」の場合には、図15に示す状態における第1量子ビット素子構造102の量子準位106、110および第2量子ビット素子構造104の量子準位114、118に関して、互いの電子が対角線上に存在しないとき（コントロールビットの状態が $|0\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|0\rangle$ である場合およびコントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ である場合）には「 $C1 = 0$ 」および「 $C2 = 0$ 」の場合と比べてエネルギーはほとんど変化しないが、互いの電子が対角線上に存在するとき（コントロールビットの状態が $|0\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|1\rangle$ である場合およびコントロールビットの状態が $|1\rangle$ であり、かつ、ターゲットビットの状態が $|0\rangle$ である場合）には「 $C1 = 0$ 」および「 $C2 = 0$ 」の場合よりもエネルギーが上がることになる。その差を ΔE とすると、「 $C1 \neq 0$ 」および「 $C2 \neq 0$ 」の場合には、レベルAはほとんどそのままレベルA'になり、レベルBはレベルB'に上がり、レベルCはレベルC'に上がり、レベルDはほとんどそのままレベルD'になる。

【0199】従って、量子相関ゲート素子構造100に対して、「 $E2 - \Delta E$ 」のエネルギーをもつ電磁波をラビ振動の半周期間照射することによって、コントロールビットが $|1\rangle$ のときだけ、ターゲットビットを反転することができ、図1(b)に示す真理値表の動作を実現することができる。

【0200】つまり、本発明における量子相関ゲート素子を構成する各量子ビット素子における各量子ドットの準位の上下関係、換言すれば、各量子ドットの配置関係は、どのようでもかまわないが、ラビ振動の半周期間照射する電磁波のエネルギーは、本発明における量子相関ゲート素子を構成する各量子ビット素子における各量子ドットの準位の上下関係、換言すれば、各量子ドットの配置関係に応じて変化させる必要がある。

【0201】

【発明の効果】本発明は、以上説明したように構成されているので、GaN、InNあるいはAlNやInGa

N、AlGaInなどの窒化物半導体の量子ドットを位置

制御して形成することができるようになり、それにより2つの窒化物半導体の量子ドットを極めて近接した位置に制御して配置することが可能になり、例えば、量子ビットならびに量子相関ゲートを実現することのできるといふ優れた効果を奏する。

【0202】また、本発明は、以上説明したように構成されているので、チューリング型の量子コンピュータにおける量子ビット素子構造および量子相関ゲート素子構造を固体デバイスで提供することができるようになるといふ優れた効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は量子相関ゲートを概念的に示す説明図であり、(b)は量子相関ゲートの概念的な真理値表である。

【図2】位置制御された液滴エピタキシーにより窒化物半導体の量子ドットを形成するためのプロセスを示す説明図であり、(a)は「基板」を示し、(b)は「金属液滴の形成」を示し、(c)は「窒化(半導体化)」を示し、(d)は「熱処理(高品質化)」を示す。

【図3】電子ビーム照射による基板表面の改質の原理の説明図である。

【図4】As膜を堆積したCaF₂上への電子ビームの照射と自然形成法によるGaの金属液滴の位置制御の処理の概念図である。

【図5】図4(a)(b)(c)に示す実験の結果の走査型顕微鏡写真であり、Ga液滴の間隔を150nmとし、電子ビームの照射量を0.4pC/dotとして、二次元的にスポット露光した結果を示している。

【図6】真空中でのCaF₂上への電子ビームの照射と自然形成法によるGaの金属液滴2の位置制御の処理の概念図である。

【図7】図6(a)(b)(c)に示す実験の結果の走査型顕微鏡写真であり、(a)はGa液滴の間隔を20nmとし、電子ビームの照射量を5pC/dotとして一次元的にスポット露光した結果を示し、(b)はGa液滴の間隔を17nmとし、電子ビームの照射量を5pC/dotとして一次元的にスポット露光した結果を示し、(c)はGa液滴の間隔を14nmとし、電子ビームの照射量を5pC/dotとし一次元的にスポット露光した結果を示している。

【図8】Alの核形成を用いるAl/Gaの二段階堆積法の説明図である。

【図9】本願出願人の実験によって得られたGaN量子ドットを示し、(a)は基板の温度を最終的には600

℃まで昇温した際に得られたGaN量子ドットの表面のAFMの写真であり、(b)は(a)に示されたGaN量子ドットの断面図である。

【図10】室温における図9(a)に示すGaN量子ドットのPLスペクトルを示すグラフである。

【図11】(a)は図9(a)に示すGaN量子ドットを1000℃で熱処理する前(before)と熱処理した後(after)とのPLスペクトルを示すグラフであり、(b)は300nmの厚さのGaN膜と図9(a)に示すGaN量子ドットを1000℃で熱処理した後のGaN量子ドットとの77KにおけるPLスペクトルを示すグラフである。

【図12】本発明による量子コンピュータにおける量子ビット素子構造の実施の形態の一例を示す概念構成説明図である。

【図13】本発明による量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造の実施の形態の一例の概念構成説明図である。

【図14】図13に示す量子相関ゲート素子構造に関して、量子相関ゲートの作用前の状態における、第1量子ビット素子構造の電子のエネルギーと第2量子ビット素子構造の電子のエネルギーとの合計値を示すエネルギーレベル状態図である。

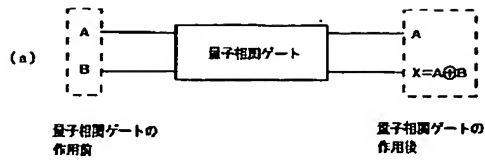
【図15】本発明による量子コンピュータにおける量子相関ゲート素子構造の他の実施の形態の一例の概念構成説明図である。

【図16】図15に示す量子相関ゲート素子構造に関して、量子相関ゲートの作用前の状態における、第1量子ビット素子構造の電子のエネルギーと第2量子ビット素子構造の電子のエネルギーとの合計値を示すエネルギーレベル状態図である。

【符号の説明】

| | |
|-----------------------|--------------|
| 1 | 基板 |
| 2 | 金属液滴 |
| 4 | 窒化物半導体の量子ドット |
| 10 | 量子ビット素子構造 |
| 12、14、108、112、116、120 | 量子ドット |
| 16、18、106、110、114、118 | 量子 |
| 40 | 単位 |
| 100 | 量子相関ゲート素子構造 |
| 102 | 第1量子ビット素子構造 |
| 104 | 第2量子ビット素子構造 |
| 122、124、126、128 | 可変コンデンサ |

【図1】

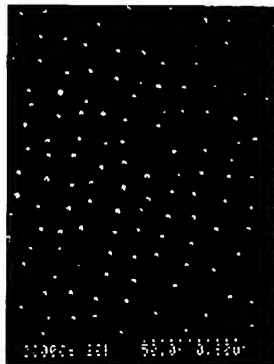


(b)

| 量子相関ゲートの作用前 | | 量子相関ゲートの作用後 | |
|-------------|----|-------------|-------|
| A | B | A | X=A⊕B |
| 0> | 0> | 0> | 0> |
| 0> | 1> | 0> | 1> |
| 1> | 0> | 1> | 1> |
| 1> | 1> | 1> | 0> |

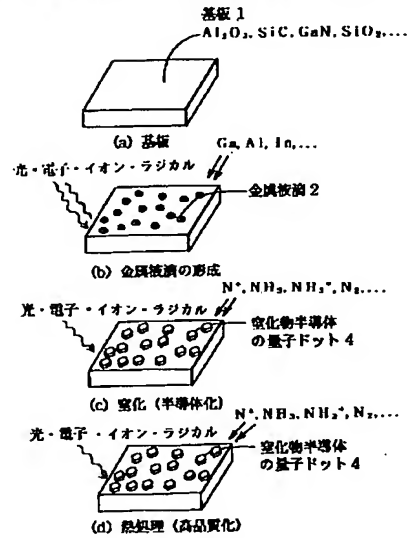
A: コントロールビット
B: ターゲットビット

【図5】

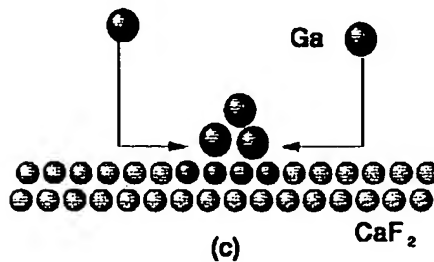
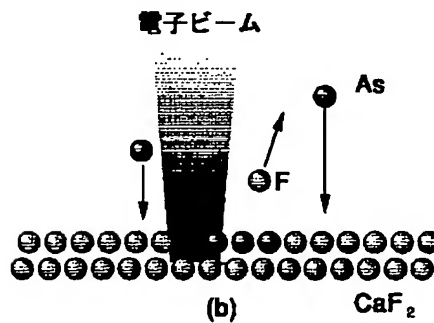
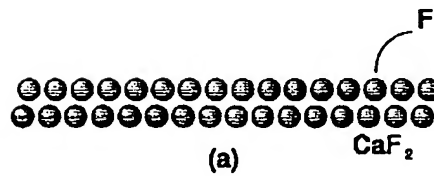


【図2】

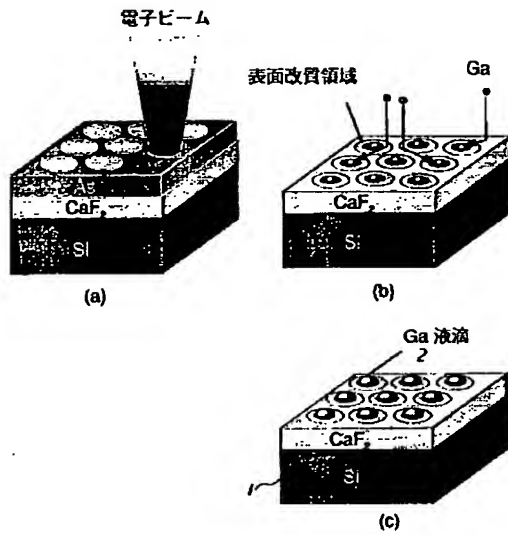
位相制御された液相エピタキシーによる窒化物半導体量子ドット形成プロセス



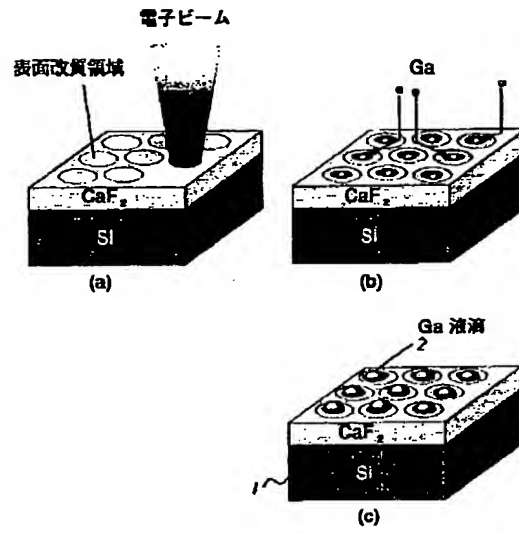
【図3】



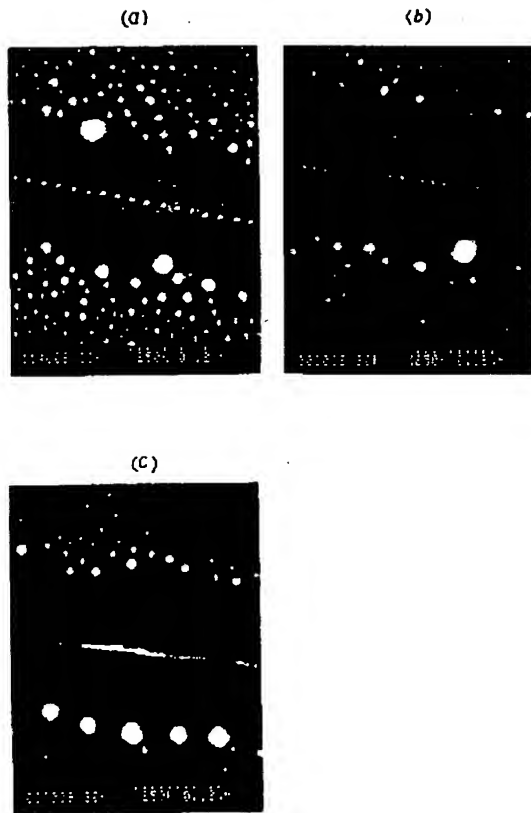
【図4】



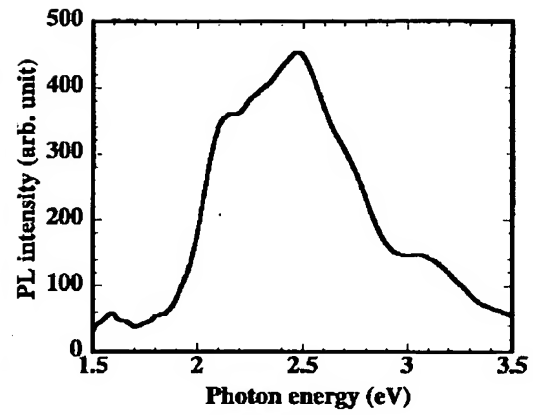
【図6】



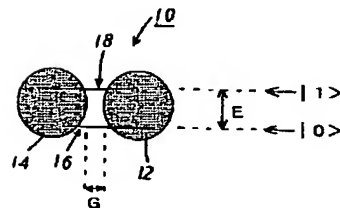
【図7】



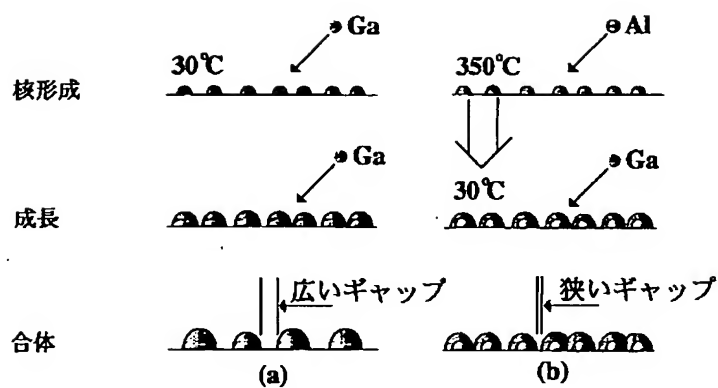
【図10】



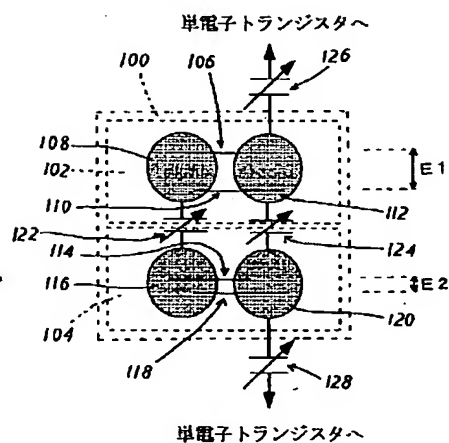
【図12】



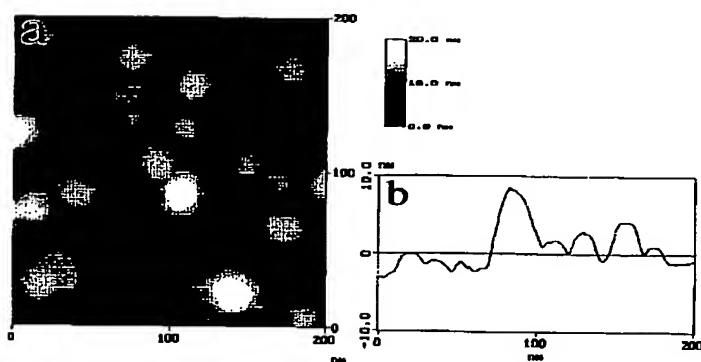
【図8】



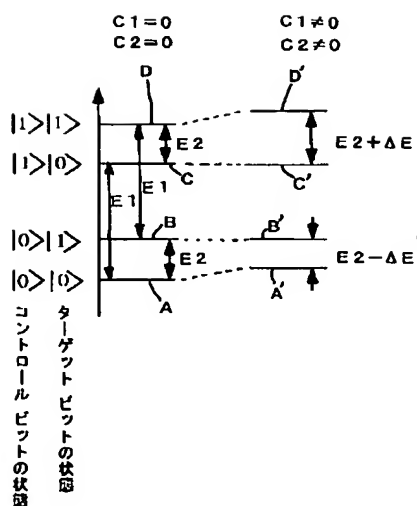
【図13】



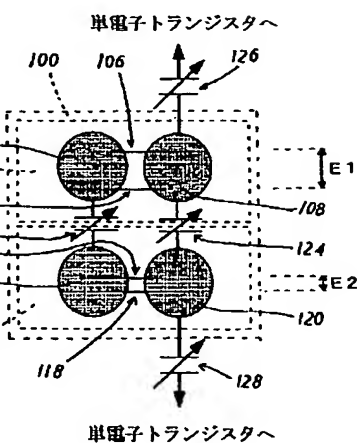
【図9】



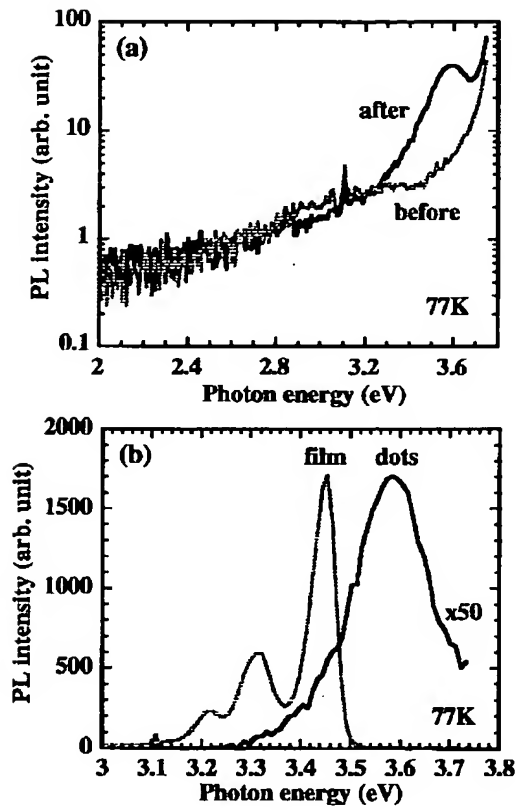
【図14】



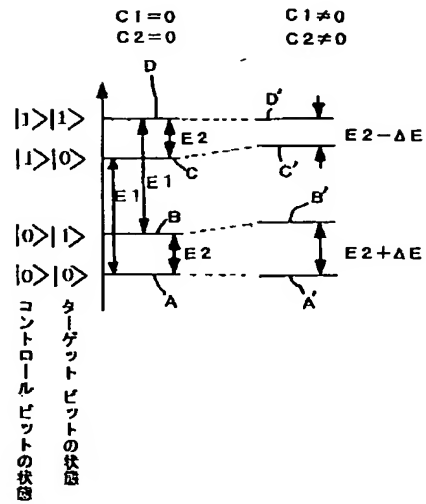
【図15】



【図11】



【図16】



フロントページの続き

(72)発明者 筒井 一生
神奈川県横浜市緑区長津田町4259番地 東
京工業大学内

Fターム(参考) 5F053 AA50 DD20 FF10 GG01 HH04
HH05 LL10 PP14 RR20
5F103 AA04 AA05 DD28 HH03 HH04
LL17 PP04 PP20